

**Badische Landesbibliothek Karlsruhe**

**Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe**

**Untersuchungen über die Explosionsgrenzen brennbarer  
Gase und Dämpfe**

**Eitner, Paul**

**München, 1902**

II. Abschnitt. Änderung des Explosionsbereiches durch verdünnende Gase

[urn:nbn:de:bsz:31-270244](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-270244)

## II. Abschnitt.

### Anderung des Explosionsbereiches durch verdünnende Gase.

In dem ersten Abschnitt dieser Arbeit sind nur Explosionsversuche besprochen, die mit Gemischen reiner Gase und reiner atmosphärischer Luft ausgeführt wurden. Solche einfachen Verbrennungsbedingungen finden sich häufig in der Praxis, und auf diese Fälle sind dann die hier gewonnenen Resultate ohne weiteres zu übertragen.

Sehr oft aber liegen auch die Verhältnisse komplizierter: Die Verbrennungsluft ist häufig schon durch vorausgehende Verbrennungsvorgänge in ihrer Zusammensetzung verändert, ihr Sauerstoffgehalt ist vermindert, und dafür enthält sie Wasserdampf und Kohlensäure. Ihre Fähigkeit, die Verbrennung zu unterhalten, ist dadurch beeinträchtigt, und das muß sich bei den Explosionsversuchen in einer Verengerung des Explosionsbereiches ausdrücken.

Solche veränderten Verbrennungsbedingungen finden sich bei den brennenden Gasstrahlen (Flammen) in der äußeren Mantelzone, sie finden sich u. a. auch bei den Explosionsgemischen der Gasmotoren. Denn hier werden die in der Explosionskammer zurückbleibenden Auspuffgase der neuen Cylinderfüllung zugemischt, wodurch dieselbe eine Zusammensetzung der oben besprochenen Art erhält.

Von diesen Verbrennungsbedingungen zu unterscheiden sind solche, bei denen der Verbrennungsluft anderweitig entstandene Kohlensäure oder Wasserdampf zugemischt sind. Auch solche Bedingungen kommen in der Praxis vor, z. B. in Kalköfen, in Wäschereien, in Bergwerken u. s. w., oder aber sie werden künstlich herbeigeführt, um Explosionsgefahren zu vermeiden, oder einen ausgebrochenen Brand zu ersticken. Auch hier findet die auslöschende Wirkung der



zugesetzten inerten Gase ihren Ausdruck in einer Verengerung des Explosions- bzw. Verbrennungsbereiches.

Es ist ohne weiteres einleuchtend, daß die Explosionsgrenzen um so enger zusammenrücken werden, je mehr inertes Gas der Verbrennungsluft zugesetzt wird. Es ist auch nach den früheren, oben citierten Beobachtungen von Bunsen<sup>1)</sup> vorauszusehen, daß verschiedene inerte Gase sich hinsichtlich ihrer auslöschenden Wirkung verschieden verhalten werden, ja es ist von vornherein als wahrscheinlich zu bezeichnen, daß die verschiedenen brennbaren Gase sich dieser auslöschenden Wirkung gegenüber in verschiedenem Grade widerstandsfähig erweisen werden. Aber irgend welche Beobachtungen, aus denen diese Verhältnisse quantitativ bestimmbar wären, sind bis jetzt nicht bekannt, und das experimentelle Material, welches Anhaltspunkte in dieser Richtung geben könnte, beschränkt sich auf einige wenige Beobachtungen.<sup>2)</sup>

Andererseits gewinnt die Frage nach der Wirkung inerter Gase in Explosionsgemischen in steigendem Maße an praktischer Bedeutung, je mehr man dazu übergeht, sog. »arme Gase«, Hochofengase etc., zum Betrieb von Motoren zu verwenden.

Um hier die nötigen experimentellen Grundlagen zu schaffen, wurden die im folgenden beschriebenen Versuche unternommen. Im Interesse der Übersichtlichkeit wurden wieder die Versuchsbedingungen so einfach als möglich gewählt. Der erste Teil dieses Abschnittes behandelt den Einfluß der Kohlensäure auf die Weite des Explosionsbereiches, wenn Kohlensäure schrittweise den Sauerstoff der Verbrennungsluft ersetzt, der zweite Teil den Einfluß dieses Gases, wenn es der Verbrennungsluft in steigendem Verhältnis zugesetzt wird. Im dritten Teil ist die Veränderung der Ex-

<sup>1)</sup> Bunsen, Gasometr. Methoden, II. Aufl., S. 337 ff.

<sup>2)</sup> Vergl. Bunsen l. c. und E. v. Meyer l. c. Ferner haben Wagner und auch Bunte und Roskowski Explosionsgrenzen brennbarer Gase in Mischungen mit einer Luft festgestellt, in welcher der Stickstoff durch Kohlensäure ersetzt war (vergl. die bei der Besprechung der Litteratur citierten Arbeiten).



plosionsgrenzen untersucht, welche durch Zumischung von Wasserdampf zum Gasgemenge hervorgebracht wird. Um schließlich noch die Wirkung einzelner inerte Gase in möglichst reiner Form studieren zu können, ist dann im vierten Teil noch eine Reihe von Versuchen angeführt, bei welchen Knallgase mit Sauerstoff, mit Stickstoff oder mit Kohlensäure verdünnt untersucht wurden.

Am Schlusse jeder einzelnen Versuchsreihe sind dann die gewonnenen Resultate in übersichtlicher Form graphisch dargestellt.

### Explosionen brennbarer Gase mit Luft-Kohlensäure-Mischungen.

Die Zusammensetzung der Luft-Kohlensäure-Mischungen erwies sich beim Stehen über Wasser als Sperrflüssigkeit, als unbeständig und daher unsicher. Die Mischungen wurden deshalb über Quecksilber in Glaszylindern von 1 l Inhalt aufbewahrt. Ihre Zusammensetzung wurde jeweils vor und nach jeder Versuchsreihe durch Analyse kontrolliert. Um Raum zu sparen, sind die einzelnen Analysen hier nicht angeführt.

Die Versuchsergebnisse sind in je zwei Tabellen dargestellt. Die eine Tabelle enthält die Zusammensetzung der bei verschiedenen Explosionsversuchen verwendeten Luft-Kohlensäure-Mischungen neben den bei den betreffenden Versuchen festgestellten Explosionsgrenzen. Die zweite entsprechende Tabelle (a) gibt jeweils die Gesamtanalyse der Gasmischungen an den Explosionsgrenzen.

Bei diesen Ergebnissen ist die geringfügige Verschiebung der Explosionsgrenze durch den Wasserdampfgehalt, der bei allen Versuchen rund 2% betrug, außer Berücksichtigung gelassen.

Die sämtlichen Versuche wurden über Quecksilber ausgeführt.

Explosionen  
der Sauerstoff  
wie

Luft-Kohl

No. des Vers.	Sauerstoff
1	20
2	10
3	8
4	7

Flammgeschwindigkeit  
der Gasmischungen

Unterschied

No. des Vers.	Flammgeschwindigkeit
1	1
2	1
3	1
4	1

I. Teil.

Explosionen unter Verwendung einer Luft, in welcher der Sauerstoff schrittweise durch Kohlensäure ersetzt wird, bis zum Aufhören der Explosion.

Wasserstoff und Luft-Kohlensäure-Mischungen.

Tabelle XIII.  
(Feucht gemessen.)

No. des Vers.	Luft-Kohlensäure-Mischung in Vol.-%			Brennbares Gas in der Explosions-Mischung in Vol.-%		
	Sauerstoff	Kohlensäure	Stickstoff	Keine Explosion	Explosions-Bereich	Keine Explosion
1	21,0	0,0	79,0	9,4	9,5—66,3	66,5
2	10,5	10,5	79,0	12,3	13,1—35,3	36,1
3	8,0	13,0	79,0	13,3	14,0—26,0	26,6
4	7,0	14,0	79,0	Aufhören der Explosion		

Hieraus ergibt sich folgende prozentische Zusammensetzung der Gasmischungen an den Explosionsgrenzen:

Tabelle XIIIa.  
(Feucht gemessen.)

No. des Versuchs	Untere Explosions-Grenze				Obere Explosions-Grenze			
	Wasserstoff	Sauerstoff	Kohlensäure	Stickstoff	Wasserstoff	Sauerstoff	Kohlensäure	Stickstoff
1	9,5	19,0	0,0	71,5	66,4	7,1	0,0	26,5
2	12,7	9,2	9,2	68,9	35,7	6,8	6,8	51,7
3	13,7	6,9	11,2	68,2	26,3	5,9	9,5	58,3
Aufhören der Explosion.								



**Kohlenoxyd und Luft-Kohlensäure-Mischungen.**

Tabelle XIV.  
(Feucht gemessen.)

No. des Vers.	Luft-Kohlensäure-Mischung in Vol.-%			Kohlenoxyd in der Explosions-Mischung in Vol.-%		
	Sauerstoff	Kohlensäure	Stickstoff	Keine Explosion	Explosions-Bereich	Keine Explosion
1	21,0	0,0	79,0	16,4	16,6—74,8	75,4
2	10,5	10,5	79,0	17,0	17,7—47,7	48,5
3	9,0	12,0	79,0	18,2	18,7—28,3	28,6
4	8,0	13,0	79,0	19,0	19,8—20,0	20,6
5	7,0	14,0	79,0	Aufhören der Explosion		

Hieraus ergibt sich folgende prozentische Zusammensetzung der Gasmischungen an den Explosionsgrenzen:

Tabelle XIV a.  
(Feucht gemessen.)

No. des Versuchs	Untere Explosions-Grenze				Obere Explosions-Grenze			
	Kohlenoxyd	Sauerstoff	Kohlensäure	Stickstoff	Kohlenoxyd	Sauerstoff	Kohlensäure	Stickstoff
1	16,5	17,5	0,0	66,0	75,1	5,2	0,0	19,7
2	17,4	8,7	8,7	65,2	48,1	5,5	5,5	40,9
3	18,5	7,3	9,8	64,4	28,4	6,4	8,6	56,6
4	19,4	6,4	10,5	63,7	20,3	6,4	10,3	63,0
Aufhören der Explosion.								

Methan und Luft-Kohlensäure-Mischungen.

Tabelle XV.  
(Feucht gemessen.)

No. des Vers.	Luft-Kohlensäure-Mischung in Vol.-%			Methan in der Explosions-Mischung in Vol.-%		
	Sauerstoff	Kohlensäure	Stickstoff	Keine Explosion	Explosions-Bereich	Keine Explosion
1	21,0	0,0	79,0	6,0	6,4—12,8	13,2
2	17,0	4,0	79,0	6,3	6,8—9,4	9,9
3	16,0	5,0	79,0	6,9	7,3—8,5	8,9
4	15,0	6,0	79,0		7,6	
5	14,0	7,0	79,0	Aufhören der Explosion		

Hieraus ergibt sich folgende prozentische Zusammensetzung der Gasmischungen an den Explosionsgrenzen:

Tabelle XVa.  
(Feucht gemessen.)

No. des Versuchs	Untere Explosions-Grenze				Obere Explosions-Grenze			
	Methan	Sauerstoff	Kohlensäure	Stickstoff	Methan	Sauerstoff	Kohlensäure	Stickstoff
1	6,2	19,7	0,0	74,1	13,0	18,3	0,0	68,7
2	6,6	15,9	3,7	73,8	9,7	15,4	3,6	71,3
3	7,1	14,9	4,6	73,4	8,7	14,6	4,6	72,1
4	7,6	13,9	5,5	73,0	7,6	13,9	5,5	73,0
Aufhören der Explosion.								



Äthylen und Luft-Kohlensäure-Mischungen.

Tabelle XVI.  
(Feucht gemessen.)

Luft-Kohlensäure-Mischung in Vol.-%				Äthylen in der Explosions- Mischung in Vol.-%		
No. des Vers.	Sauer- stoff	Kohlen- säure	Stick- stoff	Keine Explo- sion	Explosions- Bereich	Keine Explo- sion
1	21,0	0,0	79,0	3,9	4,3—14,5	14,9
2	13,0	8,0	79,0	5,7	6,0—6,0	6,2
3	12,0	9,0	79,0	Aufhören der Explosion		

Hieraus ergibt sich folgende prozentische Zusammensetzung der Gasmischungen an den Explosionsgrenzen:

Tabelle XVIa.  
(Feucht gemessen.)

No. des Ver- suchs	Untere Explosions-Grenze				Obere Explosions-Grenze			
	Äthylen	Sauerstoff	Kohlen- säure	Stickstoff	Äthylen	Sauerstoff	Kohlen- säure	Stickstoff
1	4,1	20,1	0,0	75,8	14,7	17,9	0,0	67,4
2	5,9	12,2	7,5	74,4	6,1	12,2	7,5	74,2
Aufhören der Explosion.								



**Leuchtgas und Luft-Kohlensäure-Mischungen.**

Tabelle XVII.  
(Feucht gemessen.)

Luft-Kohlensäure-Mischung in Vol.-%				Leuchtgas in der Explosions- Mischung in Vol.-%		
No. des Vers.	Sauer- stoff	Kohlen- säure	Stick- stoff	Keine Explo- sion	Explosions- Bereich	Keine Explo- sion
1	21,0	0,0	79,0	7,8	8,0—19,0	19,2
2	15,7	5,3	79,0	9,2	9,6—15,0	15,5
3	13,4	7,6	79,0	10,3	10,9—12,0	12,4
4	12,8	8,2	79,0	Aufhören der Explosion		

Hieraus ergibt sich folgende prozentische Zusammensetzung der Gasmischungen an den Explosionsgrenzen:

Tabelle XVII a.  
(Feucht gemessen.)

No. des Ver- suchs	Untere Explosions-Grenze				Obere Explosions-Grenze			
	Leuchtgas	Sauerstoff	Kohlen- säure	Stickstoff	Leuchtgas	Sauerstoff	Kohlen- säure	Stickstoff
1	7,9	19,3	0,0	72,8	19,1	17,0	0,0	63,9
2	9,4	14,2	4,8	71,6	15,3	13,3	4,5	66,9
3	10,6	12,0	6,8	70,6	12,2	11,8	6,7	69,3
Aufhören der Explosion.								

Acetylen und Luft-Kohlensäure-Mischungen.

Tabelle XVIII.  
(Feucht gemessen.)

No. des Vers.	Luft-Kohlensäure-Mischung in Vol.-%			Acetylen in der Explosions-Mischung in Vol.-%		
	Sauerstoff	Kohlensäure	Stickstoff	Keine Explosion	Explosions-Bereich	Keine Explosion
1	21,0	0,0	79,0	3,3	3,6—52,0	52,4
2	12,0	9,0	79,0	3,7	3,8— 9,3	10,1
3	10,0	11,0	79,0	3,7	3,9— 6,5	6,7
4	9,0	12,0	79,0		5,5	
5	8,0	13,0	79,0	Aufhören der Explosion		

Hieraus ergibt sich folgende prozentische Zusammensetzung der Gasmischungen an den Explosionsgrenzen:

Tabelle XVIIIa.  
(Feucht gemessen.)

No. des Versuchs	Untere Explosions-Grenze				Obere Explosions-Grenze			
	Acetylen	Sauerstoff	Kohlensäure	Stickstoff	Acetylen	Sauerstoff	Kohlensäure	Stickstoff
1	3,4	20,3	0,0	76,3	52,2	10,0	0,0	37,8
2	3,8	11,5	8,7	76,0	9,7	10,8	8,1	71,4
3	3,8	9,6	10,6	76,0	6,6	9,3	10,3	73,8
4	5,5	8,5	11,3	74,7	5,5	8,5	11,3	74,7
Aufhören der Explosion.								

Die Resultate der oben wiedergegebenen sechs Versuchsreihen sind in nachstehender graphischen Darstellung (Fig. 2) zusammengefaßt.

A. B. ...  
 K. ...  
 ...



Einfluss der Kohlensäure auf die Weite der Explosionsgrenzen bei fortschreitendem Ersatz des Sauerstoffs in der Verbrennungsluft durch Kohlensäure.

Abzisse: Kohlensäure in Vol.-%  
 Ordinate: Brenn. Gas in Vol.-%

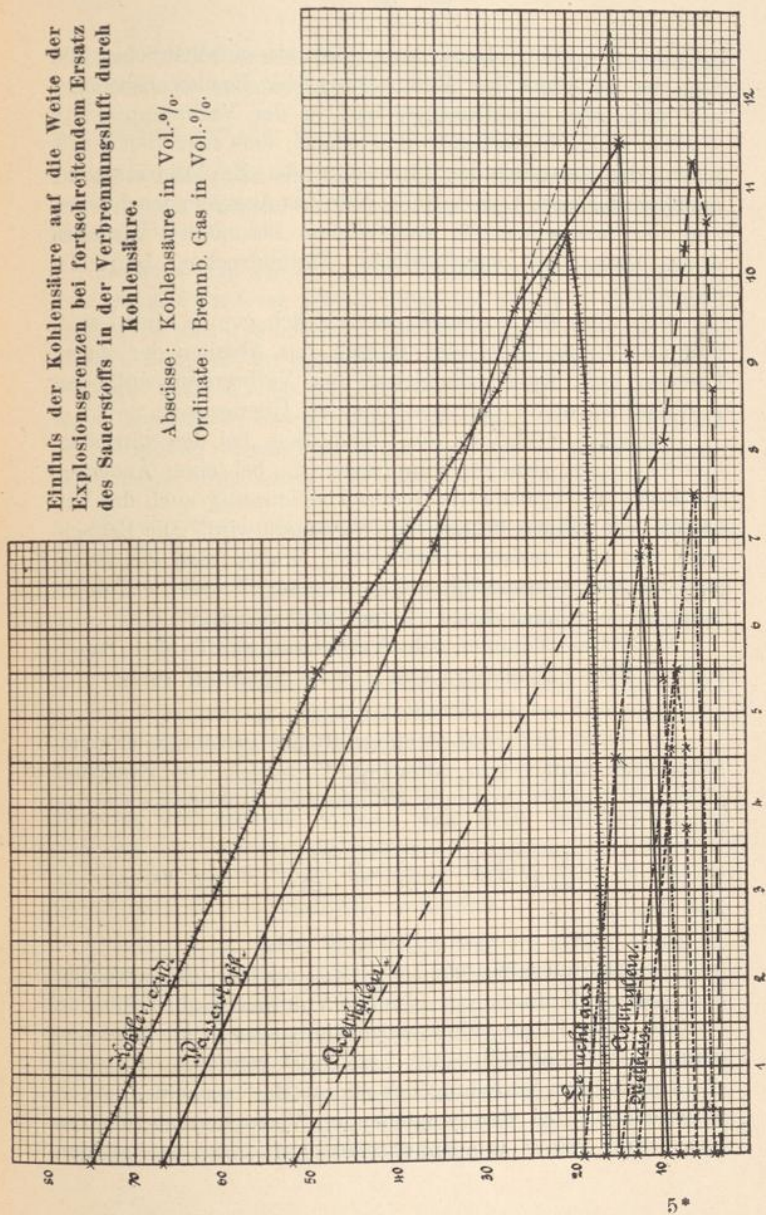


Fig. 2.



Die graphische Darstellung gibt ein anschauliches Bild von der zunehmenden Verengung der Explosionsbereiche mit steigendem Kohlensäuregehalt in der Verbrennungsluft.

Besonders bemerkenswert ist dabei, daß nach den Ergebnissen der Versuche die Begrenzung der Explosionsbereiche annähernd gerade Linien sind. Nur das Acetylen macht hiervon eine Ausnahme, die wohl in dem besonderen Verhalten dieses Gases bei verschiedenen Partialdrucken begründet sein dürfte.

Daß diese Begrenzungslinien wirklich gerade Linien sind, daß also das Ansteigen der unteren, das Abfallen der oberen Grenzen dem Kohlensäuregehalt der Verbrennungsluft proportional ist, ergibt sich aus folgender Überlegung:

Zunächst erscheinen die Verhältnisse bei den vorstehenden Versuchen ziemlich kompliziert, da bei einer Änderung des Kohlensäuregehalts im Gemisch gleichzeitig auch das Verhältnis der übrigen Bestandteile verändert wird. Die Betrachtung läßt sich indessen vereinfachen, indem man den Stickstoff der Verbrennungsluft auf den Sauerstoff und die Kohlensäure im Verhältnis dieser beiden Gase verteilt.

Enthält ein Volumen  $v$  der Verbrennungsluft  $o$  Teile Sauerstoff,  $k$  Teile Kohlensäure und  $n$  Teile Stickstoff, so ist

$$v = o + k + n.$$

Da ferner diese Verbrennungsluft aus gewöhnlicher atmosphärischer Luft durch einfachen Austausch von Sauerstoff gegen ein gleiches Volumen Kohlensäure hervorgegangen ist, so ist

$$n = \frac{79}{21} (o + k) = \frac{79}{21} o + \frac{79}{21} k = n_o + n_k$$

und demnach

$$v = (o + n_o) + (k + n_k)$$

$(o + n_o)$  ist atmosphärische Luft,  $(k + n_k)$  ist Luft, in welcher aller Sauerstoff durch ein gleiches Volumen Kohlensäure ersetzt ist. Der Kürze halber möge diese letztere im folgenden einfach als »Kohlensäureluft« bezeichnet werden.

Durch diese Verteilung des Stickstoffes erscheint die Verbrennungsluft bei den vorstehenden Versuchen als ein Gemisch von reiner atmosphärischer Luft mit wechselnden



Mengen von Kohlensäureluft. An der graphischen Darstellung wird dadurch nichts geändert. Man hat nur die Prozente Kohlensäure auf der Abscissenachse mit  $\frac{100}{21}$  multipliziert zu denken, dann gibt die Figur direkt die Verschiebung der Grenzen bei steigendem Gehalt des Gemisches an Kohlensäureluft.

Rechnet man ferner an der unteren Explosionsgrenze zu dem brennbaren Gase jeweils dasjenige Volumen atmosphärischer Luft hinzu, welches zur vollständigen Verbrennung des ersteren nötig ist, an der oberen Explosionsgrenze zu der im Gemisch vorhandenen atmosphärischen Luft dasjenige Volumen brennbaren Gases, welches mit dieser gerade vollständig zu verbrennen vermag, so erhält man die in den explosiven Mischungen enthaltenen Volumina der »Luftknallgase«.

Neben diesen Luftknallgasen bleibt dann in den Mischungen nur noch:

1. an der unteren Explosionsgrenze ein Gasgemenge, welches aus dem Rest der atmosphärischen Luft und der Kohlensäureluft besteht,
2. an der oberen Explosionsgrenze ein Gasgemenge, welches aus dem Rest des brennbaren Gases und der Kohlensäureluft zusammengesetzt ist.

Zur weiteren Vereinfachung der Betrachtung möge ferner zunächst vorausgesetzt werden, dafs diese Gasgemenge gar nicht an der Verbrennung teilnehmen, dafs sie sich also völlig als Gemisch inerte Gase verhalten, die in den explosiven Gemengen nur die Knallgase verdünnen.

Nimmt man dann schliesslich das im ersten Abschnitt dieser Arbeit wiedergegebene Le Chateliersche Gesetz auch in seiner allgemeinsten Form als gültig an, wonach Gasgemenge, die selbst an den Explosionsgrenzen stehen, bei der Vermischung wieder Gemenge liefern, welche sich an der Explosionsgrenze befinden, sofern durch die Mischung nicht neue Verbrennungsbedingungen geschaffen werden, so besagt dasselbe für den vorliegenden Fall:



Jedes Volumen eines inerten Gases erfordert einen ganz bestimmten Zusatz von Knallgas, um verbrennlich zu werden, und dieses Verhältnis des erforderlichen Knallgasvolumens zum Volumen des inerten Gases bleibt auch in der Mischung mit anderen ebenfalls an der Explosionsgrenze stehenden Gasgemengen erhalten.

Verschiedene inerte Gase aber erfordern verschiedene Knallgaszusätze, um verbrennlich zu werden. So braucht z. B. die Kohlensäureluft zur Ermöglichung einer fortschreitenden Verbrennung einen erheblich größeren Knallgaszusatz als die gewöhnliche atmosphärische Luft.

Will man diese Gesetzmäßigkeit auf die in Rede stehenden Versuche anwenden, so hat man nur die Knallgas mengen in den an den Explosionsgrenzen stehenden Mischungen auf die in denselben enthaltenen inerten Gase so verteilt zu denken, daß jedes für sich ein an der Explosionsgrenze stehendes Gemenge bildet. Hierzu ist nach dem oben besprochenen Gesetz die vorhandene Knallgasmenge gerade notwendig und ausreichend.

Bei dieser Verteilung der Gase erscheinen dann die untersuchten Gasgemische einfach als ein Gemenge zweier an der Explosionsgrenze stehender Gasmischungen, von denen die eine mit steigendem Kohlensäuregehalt zunimmt, während die andere entsprechend abnimmt. Da diese Änderung des Mengenverhältnisses, wie ohne weiteres ersichtlich, dem Kohlensäuregehalte direkt proportional ist, so ist auch die hiermit verbundene Änderung im Gehalt der Mischung an Knallgas bzw. brennbarem Gas der Kohlensäuremenge proportional, d. h. die Begrenzungslinien der Explosionsbereiche in der oben gegebenen graphischen Darstellung müssen gerade Linien sein.

Hierzu sind indessen noch einige Bemerkungen zu machen. Die hier angestellte Überlegung setzte voraus, daß die im explosiven Gemisch neben dem Luftknallgas vorhandenen sonstigen Gase nicht an der Verbrennung teilnehmen, also sich wie inerte Gase verhalten. Diese Voraussetzung trifft bei den besprochenen Versuchen an den unteren Explosionsgrenzen zu, an den oberen dagegen nur beim Kohlenoxyd. Der



Wasserstoff und alle Kohlenwasserstoffe verhalten sich anders. Denn einerseits geht hier ein Teil der im Gemisch enthaltenen Kohlensäure mit in die Verbrennung ein, indem dieser Teil zu Kohlenoxyd reduziert wird, andererseits verbrennt erheblich mehr brennbares Gas, als dem theoretischen Knallgas entspricht, aber die Verbrennung ist unvollständig, d. h. sie liefert als Produkte je nach den Bedingungen verschiedene Mengen von Kohlenoxyd, Wasserstoff, Kohlensäure und Wasserdampf.

Trotzdem müssen auch hier die Begrenzungslinien der Explosionsbereiche gerade Linien sein, denn die Verbrennungsbedingungen ändern sich stetig und direkt proportional dem wachsenden Kohlensäuregehalt.

Selbstverständlich gelten alle diese Betrachtungen nur so lange, als in den Gasgemengen alle hier in Betracht gezogenen Bestandteile angenommen werden können. Verschwindet bei zunehmendem Kohlensäuregehalt der eine Bestandteil, z. B. an der unteren Grenze die überschüssige Luft, so erhält die Gerade an dieser Stelle einen Knickpunkt und ändert ihre Richtung. Diese Thatsache tritt auch in der graphischen Darstellung deutlich hervor.

Wie aus der Annahme, daß das oben erwähnte Le Chateliersche Gesetz in der gegebenen allgemeinen Form auch allgemeine Gültigkeit habe, gefolgert werden konnte, daß die Begrenzungslinien der Explosionsbereiche gerade Linien sein müssen, so kann umgekehrt die Thatsache, daß die Resultate der Versuche wirklich mit dieser Folgerung im Einklang stehen, als Beweis für die allgemeine Gültigkeit des Gesetzes in der gegebenen allgemeinen Form angesprochen werden. Indessen reicht hierzu das experimentelle Material nicht aus, da bei den Versuchen, die zu anderem Zwecke angestellt waren, zu wenig Punkte der Begrenzungslinien ermittelt sind.

Einfacher und weniger schwierig in der Ausführung sind die im folgenden beschriebenen Versuche, die unter ähnlichen Gesichtspunkten betrachtet werden können.

II. Teil.

Explosionen unter Verwendung einer Luft, welcher Kohlensäure schrittweise zugemischt wird, bis zum Aufhören der Explosion.

Wasserstoff und Luft-Kohlensäure-Mischungen.

Tabelle XIX.  
(Feucht gemessen.)

Luft-Kohlensäure-Mischung in Vol.-%			Wasserstoff in der Explosions-Mischung in Vol.-%		
No. des Versuchs	Luft	Kohlen- säure	Keine Explosion	Explosions- Bereich	Keine Explosion
1	100,0	0,0	9,4	9,5—66,3	66,5
2	49,0	51,0	13,6	13,8—26,2	26,5
3	48,0	52,0	Aufhören der Explosion		

Hieraus ergibt sich folgende prozentische Zusammensetzung der noch brennbaren Gasmischungen:

Tabelle XIX a.  
(Feucht gemessen.)

No. des Ver- suchs	Untere Explosions-Grenze				Obere Explosions-Grenze			
	Wasser- stoff	Sauerstoff	Stickstoff	Kohlen- säure	Wasser- stoff	Sauerstoff	Stickstoff	Kohlen- säure
1	9,5	19,0	71,5	0,0	66,4	7,1	26,5	0,0
2	13,7	8,9	33,4	44,0	26,4	7,6	28,5	37,5
Aufhören der Explosion.								



Kohlenoxyd und Luft-Kohlensäure-Mischungen.

Tabelle XX.  
(Feucht gemessen.)

Luft-Kohlensäure-Mischung in Vol.-%			Kohlenoxyd in der Explosions-Mischung in Vol.-%		
No. des Versuchs	Luft	Kohlen- säure	Keine Explosion	Explosions- Bereich	Keine Explosion
1	100,0	0,0	16,4	16,6—74,8	75,4
2	50,0	50,0	22,3	22,8—33,5	34,0
3	48,0	52,0		26,8	
4	47,0	53,0	Aufhören der Explosion.		

Hieraus ergibt sich folgende prozentische Zusammensetzung der noch brennbaren Gasmischungen:

Tabelle XXa.  
(Feucht gemessen.)

No. des Ver- suchs	Untere Explosions-Grenze				Obere Explosions-Grenze			
	Kohlen- oxyd	Sauerstoff	Stickstoff	Kohlen- säure	Kohlen- oxyd	Sauerstoff	Stickstoff	Kohlen- säure
1	16,5	17,5	66,0	0,0	75,1	5,2	19,7	0,0
2	22,6	8,1	30,6	38,7	33,8	7,0	26,1	33,1
3	26,8	7,4	27,7	38,1	26,8	7,4	27,7	38,1
Aufhören der Explosion.								

Methan und Luft-Kohlensäure-Mischungen.

Tabelle XXI.  
(Feucht gemessen.)

Luft-Kohlensäure-Mischung in Vol.-%			Methan in der Explosions-Mischung in Vol.-%		
No. des Versuchs	Luft	Kohlen- säure	Keine Explosion	Explosions- Bereich	Keine Explosion
1	100,0	0,0	6,0	6,4—12,8	13,2
2	90,0	10,0	7,0	7,3—10,1	10,5
3	83,0	17,0	7,5	7,8— 8,5	8,6
4	82,0	18,0	Aufhören der Explosion.		

Hieraus ergibt sich folgende prozentische Zusammensetzung der noch brennbaren Gasmischungen:

Tabelle XXIa.  
(Feucht gemessen.)

No. des Ver- suchs	Untere Explosions-Grenze				Obere Explosions-Grenze			
	Methan	Sauerstoff	Stickstoff	Kohlen- säure	Methan	Sauerstoff	Stickstoff	Kohlen- säure
1	6,2	19,7	74,1	0,0	13,0	18,3	68,7	0,0
2	7,2	17,5	66,0	9,3	10,3	17,0	63,8	9,0
3	7,7	16,1	60,5	15,7	8,6	16,2	60,0	15,5
Aufhören der Explosion.								



Athylen und Luft-Kohlensäure-Mischungen.

Tabelle XXII.  
(Feucht gemessen.)

No. des Versuchs	Luft-Kohlensäure-Mischung in Vol.-%		Äthylen in der Explosions-Mischung in Vol.-%		
	Luft	Kohlensäure	Keine Explosion	Explosions-Bereich	Keine Explosion
1	100,0	0,0	3,9	4,3—14,5	14,9
2	80,0	20,0	4,3	4,5— 8,8	9,2
3	75,0	25,0	4,9	5,3— 7,2	7,6
4	72,0	28,0	5,4	5,7— 6,8	7,2
5	69,0	31,0	5,6	6,0	6,2
6	68,0	32,0	Aufhören der Explosion.		

Hieraus ergibt sich folgende prozentische Zusammensetzung der noch brennbaren Gasmischungen:

Tabelle XXIIa.  
(Feucht gemessen.)

No. des Versuchs	Untere Explosions-Grenze				Obere Explosions-Grenze			
	Äthylen	Sauerstoff	Stickstoff	Kohlensäure	Äthylen	Sauerstoff	Stickstoff	Kohlensäure
1	4,1	20,1	75,8	0,0	14,7	17,9	67,4	0,0
2	4,4	16,1	60,4	19,1	9,0	15,3	57,5	18,2
3	5,1	15,0	56,2	23,7	7,4	14,6	54,9	23,1
4	5,6	14,3	53,7	26,4	7,0	14,1	52,9	26,0
5	5,8	13,6	51,4	29,2	6,1	13,6	51,2	29,1
Aufhören der Explosion.								

Leuchtgas und Luft-Kohlensäure-Mischungen.

Tabelle XXIII.

(Feucht gemessen.)

Luft-Kohlensäure-Mischung in Vol.-%			Leuchtgas in der Explosions-Mischung in Vol.-%		
No. des Versuchs	Luft	Kohlen- säure	Keine Explosion	Explosions- Bereich	Keine Explosion
1	100,0	0,0	7,8	8,0—19,0	19,2
2	70,0	30,0	10,5	11,2—12,0	12,6
3	69,0	31,0	Aufhören der Explosion.		

Hieraus ergibt sich folgende prozentische Zusammensetzung der noch brennbaren Gasmischungen:

Tabelle XXIIIa.

(Feucht gemessen.)

No. des Ver- suchs	Untere Explosions Grenze				Obere Explosions Grenze			
	Leuchtgas	Sauerstoff	Stickstoff	Kohlen- säure	Leuchtgas	Sauerstoff	Stickstoff	Kohlen- säure
1	7,9	19,3	72,8	0,0	19,1	17,0	63,9	0,0
2	10,9	13,1	49,3	26,7	12,3	12,9	48,5	26,3
	Aufhören der Explosion.							



Acetylen und Luft-Kohlensäure-Mischungen.

Tabelle XXIV.  
(Feucht gemessen.)

Luft-Kohlensäure-Mischung in Vol.-%			Acetylen in der Explosions-Mischung in Vol.-%		
No. des Versuchs	Luft	Kohlen- säure	Keine Explosion	Explosions- Bereich	Keine Explosion
1	100,0	0,0	3,3	3,6—52,0	52,4
2	70,0	30,0	3,7	4,1—28,6	29,1
3	61,0	39,0	4,2	4,5— 7,7	8,4
4	57,0	43,0	4,6	5,0— 6,5	7,1
5	55,0	45,0	4,8	5,0— 5,8	6,2
6	54,0	46,0	Aufhören der Explosion.		

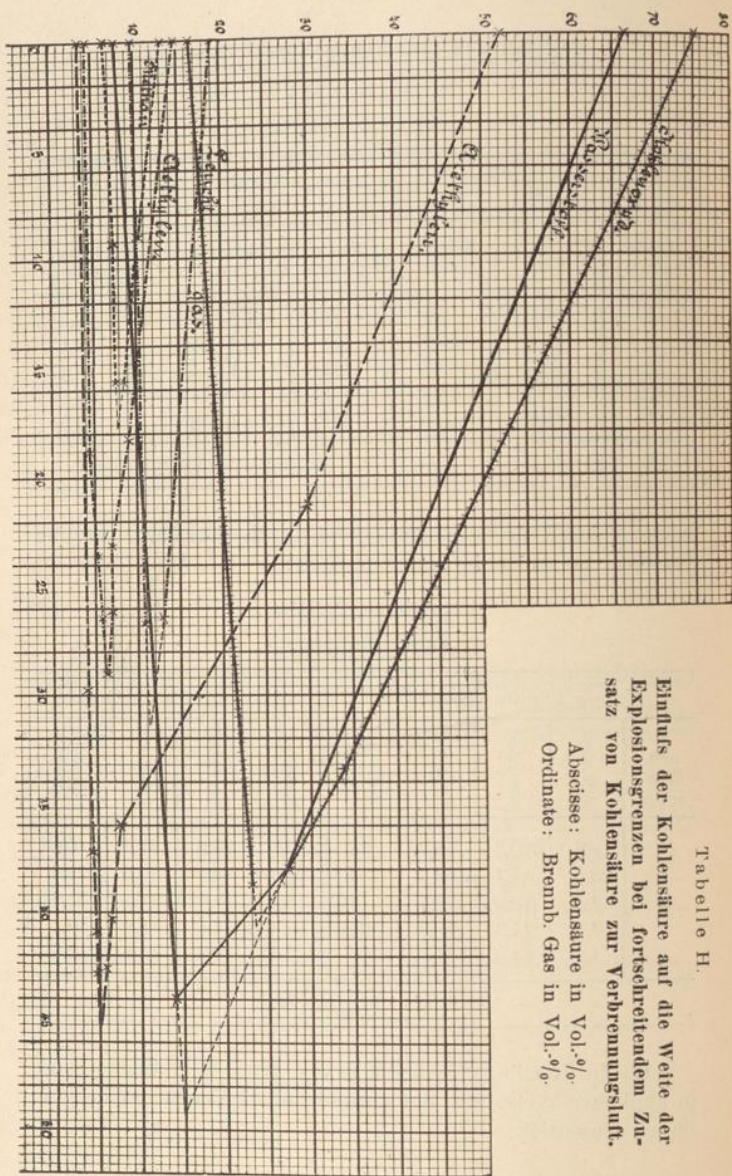
Hieraus ergibt sich folgende prozentische Zusammensetzung der noch brennbaren Gasmischungen:

Tabelle XXIVa.  
(Feucht gemessen.)

No. des Ver- suchs	Untere Explosions-Grenze				Obere Explosions-Grenze			
	Acetylen	Sauerstoff	Stickstoff	Kohlen- säure	Acetylen	Sauerstoff	Stickstoff	Kohlen- säure
1	3,5	20,3	76,2	0,0	52,2	10,0	37,8	0,0
2	3,9	14,1	53,2	28,8	28,9	10,5	39,3	21,3
3	4,4	12,2	46,1	37,3	8,1	11,8	44,3	35,8
4	4,8	11,4	42,9	40,9	6,8	11,2	41,9	40,1
5	4,9	11,0	41,3	42,8	6,0	10,9	44,8	42,3
Aufhören der Explosion.								

Die in Tabelle XIX bis XXIV gegebenen Versuche sind in ähnlicher Weise wie die vorhergehende Versuchsreihe graphisch dargestellt.





Tabell e H.

Einfluss der Kohlenäure auf die Weite der Explosionsgrenzen bei fortschreitendem Zusatz von Kohlenäure zur Verbrennungsluft.

Abscisse: Kohlenäure in Vol.-%  
 Ordinate: Brennb. Gas in Vol.-%

Fig. 3.

Vergleiche  
 mit jener der  
 weilt die gro  
 erstreckt sich  
 besprehen hier d  
 te bei der en  
 stehenden en  
 diese versch  
 te in der en  
 wische Gas m  
 Kalksäure v  
 über beide F  
 in können, m  
 nalen durch  
 100  
 multipliziert  
 10  
 Der Unter  
 erühren is  
 stützt bei  
 der Verbr  
 ähnlich ver  
 oder ähnlich  
 Explosionsbe  
 Versuchsreihe  
 her, nur ha  
 stützt an



Vergleicht man die graphische Darstellung (Tab. H, Fig. 3) mit jener der vorhergehenden Versuchsreihe (Fig. 2, S. 59), so fällt die große Ähnlichkeit beider in die Augen. Dieselbe erstreckt sich sogar auf Einzelheiten: so findet man beim Acetylen hier dasselbe spitze Auslaufen des Explosionsbereiches wie bei der ersten Versuchsreihe. Nur die Menge der in den Gemischen enthaltenen Kohlensäure ist hier viel größer, in dessen verschwindet dieser Unterschied, wenn man bedenkt, daß in der ersten Versuchsreihe nicht Kohlensäure als zugesetztes Gas zu denken ist, sondern ein Gemisch aus 21% Kohlensäure und 79% Stickstoff, die Kohlensäureluft. Um daher beide Figuren vom gleichen Gesichtspunkte betrachten zu können, müssen in der ersten (Tabelle F) die Kohlensäurezahlen durch die Zahlen für Kohlensäureluft ersetzt, d. h. mit  $\frac{100}{21}$  multipliziert gedacht werden.

Der Unterschied zwischen den besprochenen beiden Versuchsreihen ist also nur der, daß bei der ersten die Kohlensäureluft, bei der zweiten reine Kohlensäure zur Verdünnung der Verbrennungsluft verwendet worden ist. Da beide sich ähnlich verhalten, so sind auch die erzielten Resultate einander ähnlich. Auch hier müssen die Begrenzungslinien der Explosionsbereiche gerade Linien sein. Die für die erste Versuchsreihe gegebene Begründung dieses Satzes gilt auch hier, nur hat man stets mit Kohlensäure statt mit Kohlensäureluft zu rechnen.



III. Teil.

**Explosionen brennbarer Gase mit Luft-Wasserdampf-Mischungen.**

Die im folgenden zu besprechenden Versuche boten insofern eine experimentelle Schwierigkeit als dieselben bei höheren, bestimmten und konstanten Temperaturen ausgeführt werden mußten, wenn den Mischungen grössere Mengen von Wasserdampf zugefügt werden sollten. Zur Ermöglichung solcher Versuchsbedingungen wurde die Explosionsbürette mit einem Glasmantel umgeben, der oben und unten mit Zu- und Ableitungsrohr versehen war und gasdicht an die obere und untere Kapillare der Bürette anschloß. Durch den Zwischenraum zwischen Bürette und Mantel wurde ein lebhafter Dampfstrom einer konstant siedenden Flüssigkeit geleitet, der nach seinem Austritt aus dem Mantel kondensiert wurde. Als Siedeflüssigkeiten kamen Äther, Schwefelkohlenstoff, Chloroform und Alkohol zur Anwendung. Ein im Dampfmantel an die Bürette angelegtes Thermometer erlaubte die Temperatur fortlaufend zu kontrollieren.

Mit Hilfe dieser Versuchseinrichtung konnten die gewünschten Temperaturen hergestellt und konstant erhalten werden. Die Versuche selbst wurden über Quecksilber ausgeführt, wobei die Bürette stets so viel Wasser enthielt, daß das zu untersuchende Gasgemenge bei der gewählten Temperatur vollständig mit Wasserdampf gesättigt werden konnte.

Zu den Versuchen wurde jeweils ein bestimmtes Volumen Gasluftgemisch, dessen Zusammensetzung bekannt war und in beliebiger Weise verändert werden konnte, in die nasse Bürette eingefüllt. Dann wurde die Bürette mittels des Dampfmantels geheizt und zwar so lange, bis alle Verhältnisse konstant geworden waren und das Gasgemisch sich bei der betreffenden, am Thermometer abgelesenen Temperatur mit Wasserdampf gesättigt hatte. Dabei wurden die durch die Ausdehnung des Gases veranlaßten Druckunterschiede mittels des Niveaugefäßes ausgeglichen. Im übrigen wurde dann wie bei den früheren Explosionsversuchen verfahren.



In dieser Weise wurden die Gasmischungen je bei Zimmer-  
temperatur, bei 34,5<sup>o</sup> C., bei 45,0<sup>o</sup> C., 60,5<sup>o</sup> C. und 78,1<sup>o</sup> C.,  
entsprechend den Siedetemperaturen der verwendeten Siede-  
flüssigkeiten, mit Wasserdampf gesättigt, untersucht.

Die bei den Versuchen festgestellten Ergebnisse sind aus  
den folgenden Tabellen zu entnehmen. Dieselben sind ähn-  
lich eingerichtet wie die Tabellen des ersten Abschnitts. Die  
eine Tabelle gibt jeweils das Mischungsverhältnis der feuchten  
Gase bei bestimmter Temperatur und bei bestimmtem Druck.  
Die zweite Tabelle (a) enthält die daraus berechnete Zusammen-  
setzung der Gasmischungen bei Berücksichtigung des darin  
enthaltenen Wasserdampfvolumens. Die für die Tension des  
Wasserdampfes verwendeten Daten sind den Bestimmungen  
Regnaults entnommen.

Eine graphische Darstellung der Wirkung des Wasser-  
dampfes auf die Weite der Explosionsgrenzen ist auf der am  
Schlusse des Abschnittes angefügten Tafel gegeben.

1. Versuche mit Wasserstoff.

Tabelle XXV.

Wasserstoff und Luft (feucht) bei 17° C.

Druck 756 mm. Tension des Wasserdampfes: 14,4 mm.

	No. des Versuchs	Wasserstoff in Vol.-%	Luft in Vol.-%	Versuchsergebnis
Untere Grenze	1	9,3	90,7	Keine Explosion
	2	9,4	90,6	
	3	9,5	90,5	Explosions-Bereich
	4	9,6	90,4	
5	66,0	34,0		
6	66,3	33,7		
Obere Grenze	7	66,5	33,5	Keine Explosion
	8	66,6	33,4	

Hieraus ergibt sich

Tabelle XXVa.

Zusammensetzung der Wasserstoff-Luftmischungen bei Berücksichtigung des Wasserdampfvolmens.

	No. des Versuchs	Wasserstoff in Vol.-%	Luft in Vol.-%	Wasserdampf in Vol.-%	Versuchsergebnis
Untere Grenze	1	9,1	89,0	1,9	Keine Explosion
	2	9,2	88,9	1,9	
	3	9,3	88,8	1,9	Explosions-Bereich
	4	9,4	88,7	1,9	
5	64,7	33,4	1,9		
6	65,0	33,1	1,9		
Obere Grenze	7	65,2	32,9	1,9	Keine Explosion
	8	65,3	32,8	1,9	



Tabelle XXVI.

Wasserstoff und Luft (feucht) bei 34,5° C.

Druck 771,6 mm. Tension des Wasserdampfes: 40,6 mm.

	No. des Versuchs	Wasserstoff in Vol.-%	Luft in Vol.-%	Versuchs-Ergebnis
Untere Grenze	1	9,4	90,6	Keine Explosion
	2	9,5	90,5	
	3	9,8	90,2	Explosions-Bereich
	4	9,9	90,1	
.....	.....	.....		
5	62,7	37,3		
Obere Grenze	6	63,5	36,5	Keine Explosion
	7	63,8	36,2	
	8	64,4	35,6	

Hieraus ergibt sich

Tabelle XXVIa.

Zusammensetzung der Wasserstoff-Luftmischungen bei Berücksichtigung des Wasserdampfvolumens.

	No. des Versuchs	Wasserstoff in Vol.-%	Luft in Vol.-%	Wasserdampf in Vol.-%	Versuchs-Ergebnis
Untere Grenze	1	8,9	85,8	5,3	Keine Explosion
	2	9,0	85,7	5,3	
	3	9,3	85,4	5,3	Explosions-Bereich
	4	9,4	85,3	5,3	
.....	.....	.....	.....		
5	59,4	35,3	5,3		
Obere Grenze	6	60,1	34,6	5,3	Keine Explosion
	7	60,4	34,3	5,3	
	8	61,0	33,7	5,3	

6\*

Tabelle XXVII.

**Wasserstoff und Luft (feucht) bei 60,5° C.**

Druck 771,6 mm. Tension des Wasserdampfes: 152,4 mm.

	No. des Versuchs	Wasserstoff in Vol.-%	Luft in Vol.-%	Versuchs-Ergebnis
Untere Grenze	1	10,2	89,8	Keine Explosion
	2	11,7	88,3	
	3	12,0	88,0	Explosions-Bereich
	4	12,7	87,3	
5	59,5	40,5		
6	61,0	39,0		
Obere Grenze	7	61,4	38,6	Keine Explosion
	8	62,1	37,9	Explosion

Hieraus ergibt sich

Tabelle XXVIIa.

**Zusammensetzung der Wasserstoff-Luftmischungen bei Berücksichtigung des Wasserdampfvolumens.**

	No. des Versuchs	Wasserstoff in Vol.-%	Luft in Vol.-%	Wasserdampf in Vol.-%	Versuchs-Ergebnis
Untere Grenze	1	8,2	72,0	19,8	Keine Explosion
	2	9,4	70,8	19,8	
	3	9,6	70,6	19,8	Explosions-Bereich
	4	10,2	70,0	19,8	
5	47,7	32,5	19,8		
6	48,9	31,3	19,8		
Obere Grenze	7	49,2	31,0	19,8	Keine Explosion
	8	49,8	30,4	19,8	Explosion



Tabelle XXVIII.

Wasserstoff und Luft (feucht) bei 78,1° C.

Druck 765,6 mm. Tension des Wasserdampfes: 328,4 mm.

	No. des Versuchs	Wasserstoff in Vol.-%	Luft in Vol.-%	Versuchs-Ergebnis
Untere Grenze	1	18,4	81,6	Keine Explosion
	2	19,2	80,8	
	3	19,6	80,4	Explosions-Bereich
	4	20,4	79,6	
5	37,5	62,5		
6	38,2	61,8		
Obere Grenze	7	38,8	61,2	Keine Explosion
	8	39,8	60,2	

Hieraus ergibt sich

Tabelle XXVIIIa.

Zusammensetzung der Wasserstoff-Luftmischungen bei Berücksichtigung des Wasserdampf volumens.

	No. des Versuchs	Wasserstoff in Vol.-%	Luft in Vol.-%	Wasserdampf in Vol.-%	Versuchs-Ergebnis
Untere Grenze	1	10,5	46,8	42,7	Keine Explosion
	2	11,0	46,3	42,7	
	3	11,2	46,1	42,7	Explosions-Bereich
	4	11,7	45,6	42,7	
5	21,5	35,8	42,7		
6	21,9	35,4	42,7		
Obere Grenze	7	22,2	35,1	42,7	Keine Explosion
	8	22,8	34,5	42,7	

2. Versuche mit Kohlenoxyd.

Tabelle XXIX.

Kohlenoxyd und Luft (feucht) bei 14,0° C.  
 Druck 764,6 mm. Tension des Wasserdampfes: 11,9 mm.

	No. des Versuchs	Kohlenoxyd in Vol.-%	Luft in Vol.-%	Versuchsergebnis
Untere Grenze	1	15,1	84,9	Keine Explosion
	2	16,0	84,0	
	3	16,4	83,6	Explosionsbereich
⋮	⋮	⋮		
Obere Grenze	4	73,7	26,3	
	5	74,0	26,0	
	6	74,3	25,7	Keine Explosion
	7	74,7	25,3	

Hieraus ergibt sich

Tabelle XXIX a.

Zusammensetzung der Kohlenoxyd-Luftmischungen bei Berücksichtigung des Wasserdampfolumens.

	No. des Versuchs	Kohlenoxyd in Vol.-%	Luft in Vol.-%	Wasserdampf in Vol.-%	Versuchsergebnis
Untere Grenze	1	14,9	83,5	1,6	Keine Explosion
	2	15,7	82,7	1,6	
	3	16,1	82,3	1,6	Explosionsbereich
⋮	⋮	⋮	⋮		
Obere Grenze	4	72,5	25,9	1,6	
	5	72,8	25,6	1,6	
	6	73,1	25,3	1,6	Keine Explosion
	7	73,5	24,9	1,6	



Tabelle XXX.

**Kohlenoxyd und Luft (feucht) bei 34,5° C.**

Druck 764,6 mm. Tension des Wasserdampfes: 40,6 mm.

	No. des Versuchs	Kohlenoxyd in Vol.-%	Luft in Vol.-%	Versuchs-Ergebnis
Untere Grenze	1	15,9	84,1	Keine Explosion
	2	16,7	83,3	
	3	17,0	83,0	Explosions-Bereich
	4	17,4	82,6	
5	72,0	28,0		
6	73,4	26,6		
Obere Grenze	7	73,6	26,4	Keine Explosion
	8	73,8	26,2	

Hieraus ergibt sich

Tabelle XXXa.

**Zusammensetzung der Kohlenoxyd-Luftmischungen bei Berücksichtigung des Wasserdampfolumens.**

	No. des Versuchs	Kohlenoxyd in Vol.-%	Luft in Vol.-%	Wasserdampf in Vol.-%	Versuchs-Ergebnis
Untere Grenze	1	15,1	79,6	5,3	Keine Explosion
	2	15,8	78,9	5,3	
	3	16,1	78,6	5,3	Explosions-Bereich
	4	16,5	78,2	5,3	
5	68,2	26,5	5,3		
6	69,5	25,2	5,3		
Obere Grenze	7	69,7	25,0	5,3	Keine Explosion
	8	69,9	24,8	5,3	

Tabelle XXXI.

**Kohlenoxyd und Luft (feucht) bei 60,5° C.**

Druck 767,6 mm. Tension des Wasserdampfes: 152,4 mm.

	No. des Versuchs	Kohlenoxyd in Vol.-%	Luft in Vol.-%	Versuchs-Ergebnis
Untere Grenze	1	18,5	81,5	Keine Explosion
	2	19,8	80,2	
	3	20,1	79,9	Explosions-Bereich
	4	20,8	79,2	
.....	.....	.....		
5	66,0	34,0		
Obere Grenze	6	68,2	31,8	Keine Explosion
	7	68,6	31,4	
	8	70,9	29,1	

Hieraus ergibt sich

Tabelle XXXIa.

**Zusammensetzung der Kohlenoxyd-Luftmischungen bei Berücksichtigung des Wasserdampfvolumens.**

	No. des Versuchs	Kohlenoxyd in Vol.-%	Luft in Vol.-%	Wasserdampf in Vol.-%	Versuchs-Ergebnis
Untere Grenze	1	15,0	66,1	18,9	Keine Explosion
	2	16,1	65,0	18,9	
	3	16,3	64,8	18,9	Explosions-Bereich
	4	16,9	64,2	18,9	
.....	.....	.....	.....		
5	53,5	27,6	18,9		
Obere Grenze	6	55,3	25,8	18,9	Keine Explosion
	7	55,8	25,3	18,9	
	8	57,5	23,6	18,9	



Tabelle XXXII.

Kohlenoxyd und Luft (feucht) bei 78,1° C.

Druck 764,6 mm. Tension des Wasserdampfes: 328,4 mm

	No. des Versuchs	Kohlenoxyd in Vol.-%	Luft in Vol.-%	Versuchs-Ergebnis
Untere Grenze	1	28,9	71,1	Keine Explosion
	2	29,2	70,8	
	3	29,6	70,4	Explosions-Bereich
	4	31,8	68,2	
5	45,8	54,2		
6	50,2	49,8		
Obere Grenze	7	50,6	49,4	Keine Explosion
	8	51,4	48,6	

Hieraus ergibt sich

Tabelle XXXIIa.

Zusammensetzung der Kohlenoxyd-Luftmischungen bei Berücksichtigung des Wasserdampfolumens.

	No. des Versuchs	Kohlenoxyd in Vol.-%	Luft in Vol.-%	Wasserdampf in Vol.-%	Versuchs-Ergebnis
Untere Grenze	1	16,5	40,5	43,0	Keine Explosion
	2	16,6	40,4	43,0	
	3	16,9	40,1	43,0	Explosions-Bereich
	4	18,1	38,9	43,0	
5	26,1	30,9	43,0		
6	28,6	28,4	43,0		
Obere Grenze	7	28,8	28,2	43,0	Keine Explosion
	8	29,3	27,7	43,0	

3. Versuche mit Methan.

Tabelle XXXIII

Methan und Luft (feucht) bei 20° C.

Druck 725 mm. Tension des Wasserdampfes: 17,4 mm

	No. des Versuchs	Methan in Vol.-%	Luft in Vol.-%	Versuchs-Ergebnis
Untere Grenze	1	5,8	94,2	Keine Explosion
	2	6,0	94,0	
	3	6,2	93,8	Explosions-Bereich
	4	6,4	93,5	
5	12,0	88,0		
6	12,7	87,3		
Obere Grenze	7	12,9	87,1	Keine Explosion
	8	13,2	86,7	

Hieraus ergibt sich

Tabelle XXXIIIa.

Zusammensetzung der Methan-Luftmischungen bei Berücksichtigung des Wasserdampfolumens.

	No. des Versuchs	Methan in Vol.-%	Luft in Vol.-%	Wasserdampf in Vol.-%	Versuchs-Ergebnis
Untere Grenze	1	5,7	92,0	2,3	Keine Explosion
	2	5,9	91,8	2,3	
	3	6,1	91,6	2,3	Explosions-Bereich
	4	6,4	91,3	2,3	
5	11,7	86,0	2,3		
6	12,4	85,3	2,3		
Obere Grenze	7	12,6	85,1	2,3	Keine Explosion
	8	13,0	84,7	2,3	



Tabelle XXXIV.

**Methan und Luft (feucht) bei 34,5° C.**

Druck 768,6 mm. Tension des Wasserdampfes: 40,6 mm.

	No. des Versuchs	Methan in Vol.-%	Luft in Vol.-%	Versuchs-Ergebnis
Untere Grenze	1	6,4	93,6	Keine Explosion
	2	6,7	93,3	
	3	6,9	93,1	Explosions-Bereich
	4	7,6	92,4	
5	11,6	88,4		
6	12,4	87,6		
Obere Grenze	7	12,7	87,3	Keine Explosion
	8	13,6	86,4	

Hieraus ergibt sich

Tabelle XXXIV a.

**Zusammensetzung der Methan-Luftmischungen bei Berücksichtigung des Wasserdampfolumens.**

	No. des Versuchs	Methan in Vol.-%	Luft in Vol.-%	Wasserdampf in Vol.-%	Versuchs-Ergebnis
Untere Grenze	1	6,1	88,6	5,3	Keine Explosion
	2	6,3	88,4	5,3	
	3	6,5	88,2	5,3	Explosions-Bereich
	4	7,2	87,5	5,3	
5	11,0	83,7	5,3		
6	11,7	83,0	5,3		
Obere Grenze	7	12,0	82,7	5,3	Keine Explosion
	8	12,9	81,8	5,3	

Tabelle XXXV.

**Methan und Luft (feucht) bei 45° C.**

Druck 762,6 mm. Tension des Wasserdampfes: 71,4 mm.

	No. des Versuchs	Methan in Vol.-%	Luft in Vol.-%	Versuchs-Ergebnis
Untere Grenze	1	6,4	93,6	Keine Explosion
	2	7,0	93,0	
	3	7,3	92,7	Explosions-Bereich
	4	8,6	91,4	
5	10,9	89,1		
6	11,1	88,9		
Obere Grenze	7	11,4	88,6	Keine Explosion
	8	12,0	88,0	Explosion

Hieraus ergibt sich

Tabelle XXXVa.

**Zusammensetzung der Methan-Luftmischungen bei Berücksichtigung des Wasserdampfolumens.**

	No. des Versuchs	Methan in Vol.-%	Luft in Vol.-%	Wasserdampf in Vol.-%	Versuchs-Ergebnis
Untere Grenze	1	5,8	84,8	9,4	Keine Explosion
	2	6,3	84,3	9,4	
	3	6,6	84,0	9,4	Explosions-Bereich
	4	7,8	82,8	9,4	
5	9,8	80,8	9,4		
6	10,1	80,5	9,4		
Obere Grenze	7	10,3	80,3	9,4	Keine Explosion
	8	10,9	79,7	9,4	Explosion



Die Versuchsergebnisse sind in vorstehender graphischen Darstellung zusammengefasst:

Bei der Schwierigkeit, der im vorstehenden beschriebenen Versuche, die naturgemäss sehr viel Zeit in Anspruch nahmen, erschien es angezeigt, sich mit der Prüfung des Verhaltens dreier Gase: Wasserstoff, Kohlenoxyd und Methan, zu begnügen, um so mehr, als die Resultate bei der graphischen Darstellung wiederum zu geraden Begrenzungslinien der Explosionsbereiche führten. Auch diese Resultate sind unter denselben Gesichtspunkten zu betrachten, wie die der vorhergehenden Versuchsreihen, und die dort gegebenen allgemeinen Ausführungen gelten auch hier. Hinzuzufügen wäre nur noch, dafs bei den Wasserdampfversuchen eine gröfsere Anzahl von Grenzpunkten ermittelt worden ist, und da diese thatsächlich sehr nahe gerade Linien definieren, so dürfen die erhaltenen Resultate wohl als Material zum Nachweis der allgemeinen Gültigkeit des Le Chatelierschen Gesetzes gelten.

W 45° C.  
Explosionsgrenzen

Wasserstoff	Keine Explosione
Kohlenoxyd	Keine Explosione
Methan	Keine Explosione

Wasserdampf

Wasserdampf in Vol.-%	Temperatur
0.4	100°
0.4	100°
0.4	100°
0.4	100°
0.4	100°
0.4	100°
0.4	100°
0.4	100°
0.4	100°
0.4	100°

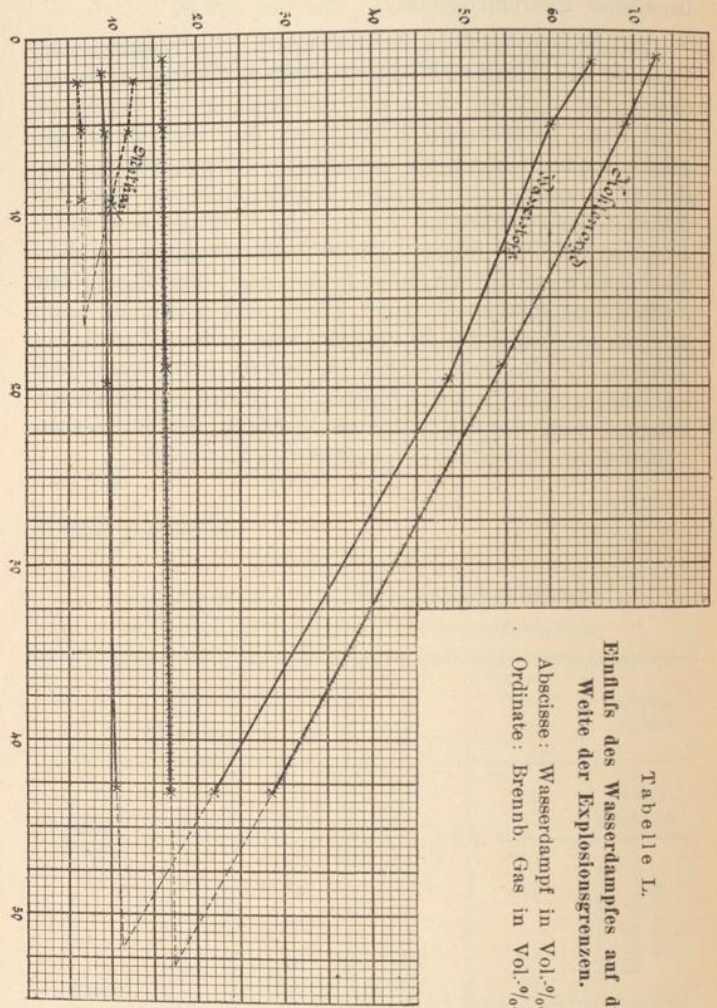


Tabelle I.  
Einfluß des Wasserdampfes auf die  
Weite der Explosionsgrenzen.  
Abzisse: Wasserdampf in Vol.-%.  
Ordinate: Brennb. Gas in Vol.-%.

Die Explosion  
grenzen Resultate  
an Gemischungen  
mit jenen inerte G  
verhältnissen. F  
weist, welcher ge  
mischt.

Auf Grund d  
Ergebnen der  
Vollst. Kopf beschrän  
kommen inerte  
vermische Gemisc  
vermische Material  
e werden daher  
bei den Versu  
eine Werte zu er  
die nicht -Luft  
Luftgew. d. h.  
zu Verhinderung  
erweicht.

Die Explosio  
stoff, Stickst  
er den Versu  
er Gaszylinder  
In Zusammen  
die durch An  
reitet über Que  
richtungen mit  
die einige Trop  
Die Versu  
erweicht.



IV. Teil.

**Explosionen von Knallgasen mit heterogenen Gasen.**

Die Diskussion der in den drei ersten Versuchsreihen erhaltenen Resultate erforderte die Zusammenfassung der in den Gasmischungen enthaltenen Gasbestandteile in der Art, daß jedes inerte Gas mit einem gewissen zugehörigen und unveränderlichen Prozentsatz von Luftknallgas versetzt erscheint, welcher gerade zur Ermöglichung einer Verbrennung ausreicht.

Auf Grund dieser Vorstellung würden sich aus den Ergebnissen der Versuche diejenigen Mengen der Luftknallgase berechnen lassen, welche jedes der hier in Frage kommenden inerten Gase erfordert, um mit demselben verbrennliche Gemische zu bilden. Das vorhandene experimentelle Material ist indessen hierzu nicht ausreichend, und es erschien daher zweckmäßiger, diese Verhältnisse direkt durch den Versuch zu prüfen. Um dabei möglichst allgemeine Werte zu erhalten, wurden in der folgenden Versuchsreihe nicht »Luftknallgase«, sondern die »theoretischen Knallgase«, d. h. Gemenge aus brennbarem Gas mit der zur Verbrennung gerade erforderlichen Menge Sauerstoff, untersucht.

Die Explosionen wurden jeweils in Verdünnung mit Sauerstoff, Stickstoff oder mit Kohlensäure ausgeführt. Die bei den Versuchen verwendeten Knallgase wurden in kalibrierten Glaszylindern über Quecksilber gemessen und aufbewahrt. Ihre Zusammensetzung wurde vor und nach jeder Versuchsreihe durch Analyse kontrolliert. Sämtliche Explosionsversuche wurden über Quecksilber ausgeführt. Zur Sättigung der Gasmischungen mit Wasserdampf befanden sich über dem Quecksilber einige Tropfen Wasser.

Die Versuchsergebnisse sind aus den folgenden Tabellen zu entnehmen.

Tabelle XXXVI.

Versuche mit Wasserstoff-Knallgas.

(Gase feucht gemessen.)

Wasserdampfgehalt 1,8%.

Zusammensetzung des verbrennlichen Gemisches	Zusammensetzung des nicht mehr verbrennlichen Gemisches
1. Wasserstoff-Knallgas mit Sauerstoff.	
Knallgas . . . 14,0 %	Knallgas . . . 13,7 %
Sauerstoff . . . 86,0 »	Sauerstoff . . . 86,3 »
100,0 %	100,0 %
2. Wasserstoff-Knallgas mit Stickstoff.	
Knallgas . . . 19,3 %	Knallgas . . . 19,0 %
Stickstoff . . . 80,7 »	Stickstoff . . . 81,0 »
100,0 %	100,0 %
3. Wasserstoff-Knallgas mit Kohlensäure.	
Knallgas . . . 31,2 %	Knallgas . . . 30,8 %
Kohlensäure . . . 68,8 »	Kohlensäure . . . 69,2 »
100,0 %	100,0 %



Tabelle XXXVII.

Versuche mit Kohlenoxyd-Knallgas.

(Gase feucht gemessen.)

Wasserdampfgehalt 2,0%.

Zusammensetzung des verbrennlichen Gemisches	Zusammensetzung des unverbrennlichen Gemisches
--	--

1. Kohlenoxyd-Knallgas mit Sauerstoff.

Knallgas . . . 23,6 %	Knallgas . . . 23,2 %
Sauerstoff . . . 76,4 »	Sauerstoff . . . 76,8 »
100,0 %	100,0 %

2. Kohlenoxyd-Knallgas mit Stickstoff.

Knallgas . . . 25,8 %	Knallgas . . . 25,4 %
Stickstoff . . . 74,2 »	Stickstoff . . . 74,6 »
100,0 %	100,0 %

3. Kohlenoxyd-Knallgas mit Kohlensäure.

Knallgas . . . 35,6 %	Knallgas . . . 35,0 %
Kohlensäure . . . 64,4 »	Kohlensäure . . . 65,0 »
100,0 %	100,0 %

Tabelle XXXVIII.

Versuche mit Methan-Knallgas.

(Gase feucht gemessen.)

Wasserdampfgehalt 1,8 %.

Zusammensetzung des verbrennlichen Gemisches	Zusammensetzung des nicht mehr verbrennlichen Gemisches
1. Methan-Knallgas mit Sauerstoff.	
Knallgas . . . 19,6 %	Knallgas . . . 19,0 %
Sauerstoff . . . 80,4 »	Sauerstoff . . . 81,0 »
100,0 %	100,0 %
2. Methan-Knallgas mit Stickstoff.	
Knallgas . . . 23,5 %	Knallgas . . . 23,1 %
Stickstoff . . . 76,5 »	Stickstoff . . . 76,9 »
100,0 %	100,0 %
3. Methan-Knallgas mit Kohlensäure.	
Knallgas . . . 32,1 %	Knallgas . . . 31,6 %
Kohlensäure . . . 67,9 »	Kohlensäure . . . 68,4 »
100,0 %	100,0 %



Tabelle XXXIX.

**Versuche mit Äthylen-Knallgas.**

(Gase feucht gemessen.)

Wasserdampfgehalt 1,9%.

Zusammensetzung des verbrennlichen Gemisches	Zusammensetzung des nicht mehr verbrennlichen Gemisches
--	---

1. Äthylen-Knallgas mit Sauerstoff.

Knallgas . . . 15,6 %		Knallgas . . . 15,2 %
Sauerstoff . . . 84,4 »		Sauerstoff . . . 84,8 »
100,0 %		100,0 %

2. Äthylen-Knallgas mit Stickstoff.

Knallgas . . . 18,7 %		Knallgas . . . 18,2 %
Stickstoff . . . 81,3 »		Stickstoff . . . 81,8 »
100,0 %		100,0 %

3. Äthylen-Knallgas mit Kohlensäure.

Knallgas . . . 22,3 %		Knallgas . . . 21,9 %
Kohlensäure . . . 77,7 »		Kohlensäure . . . 78,1 »
100,0 %		100,0 %

Tabelle XXXX.

**Versuche mit Acetylen-Knallgas.**

(Gase feucht gemessen.)

Wasserdampfgehalt 2,0 %.

Zusammensetzung des verbrennlichen Gemisches	Zusammensetzung des nicht mehr verbrennlichen Gemisches
--	---

1. Acetylen-Knallgas mit Sauerstoff.

Knallgas . . . 11,1 %	Knallgas . . . 10,6 %
Sauerstoff . . . 88,9 »	Sauerstoff . . . 89,4 »
100,0 %	100,0 %

2. Acetylen-Knallgas mit Stickstoff.

Knallgas . . . 13,2 %	Knallgas . . . 12,7 %
Stickstoff . . . 86,8 »	Stickstoff . . . 87,3 »
100,0 %	100,0 %

3. Acetylen-Knallgas mit Kohlensäure.

Knallgas . . . 18,9 %	Knallgas . . . 18,5 %
Kohlensäure . . . 81,1 »	Kohlensäure . . . 81,5 »
100,0 %	100,0 %



Übersicht.

Tabelle M.

Explosionen von Knallgasen mit heterogenen Gasen.

(Gase feucht gemessen.)

No. des Versuchs	Art des Knallgases	Explosion mit Sauerstoff	Explosion mit Stickstoff	Explosion mit Kohlensäure
1	Wasserstoff-Knallgas	13,9	19,2	30,0
2	Kohlenoxyd-Knallgas	23,4	25,6	35,3
3	Methan-Knallgas	19,3	23,3	31,9
4	Äthylen-Knallgas	15,4	18,5	22,1
5	Acetylen-Knallgas	10,9	13,0	18,7

Anmerkung. Die in der Tabelle M angegebenen Werte bezeichnen jeweils den Gehalt an Knallgas in der Mischung an den Explosionsgrenzen.

Tabelle N.

Explosionen von Knallgasen mit heterogenen Gasen.

(Bei Berücksichtigung des Wasserdampfvolumens.)

No. des Versuches	Art des Knallgases	Explosion mit Sauerstoff	Explosion mit Stickstoff	Explosion mit Kohlensäure
1	Wasserstoff-Knallgas	13,6	18,9	30,4
2	Kohlenoxyd-Knallgas	22,9	25,1	34,6
3	Methan-Knallgas	19,0	22,9	31,1
4	Äthylen-Knallgas	15,1	18,2	21,7
5	Acetylen-Knallgas	10,7	12,7	18,3

Diese Versuche wurden, wie oben erwähnt, unternommen, um die Wirkung eines jeden der in Betracht kommenden inerten Gase auf die Verschiebung der Explosionsgrenzen besonders studieren zu können, da bei den vorher beschriebenen Versuchen stets nur Mischungen derselben wie Luft (Sauerstoff und Stickstoff) oder Luft-Kohlensäure (Sauerstoff, Stickstoff und Kohlensäure) in ihrer Gesamtwirkung auf die Explosionsfähigkeit der Gasgemische betrachtet worden waren.

Die Resultate sollten dazu dienen, die einzelnen Versuchsreihen dieses Abschnittes miteinander zu verknüpfen. Es war anzunehmen, daß sich die Explosionsgrenzen eines Gases, hier speciell die untere, in Mischung mit beliebigen inerten Gasen berechnen lassen würden, wenn bekannt war, wieviel Knallgas jedes inerte Gas braucht, um mit demselben eine verbrennliche Mischung zu bilden. Diese Annahme hat sich indessen als nicht zutreffend erwiesen.

Rechnet man z. B. aus den Daten der Tabelle XXXVI (S. 88) die Menge Wasserstoff, welche zu 1 ccm Sauerstoff zugesetzt werden muß, um ein an der Explosionsgrenze stehendes Gemenge zu erhalten, und ferner die von je 1 ccm Stickstoff und Kohlensäure zur Erreichung der Verbrennlichkeit erforderlichen Zusätze an Knallgas, so erhält man:

1 ccm Sauerstoff erfordert	0,1017 ccm Wasserstoff
1 » Stickstoff »	0,2369 » Knallgas
1 » Kohlensäure »	0,4493 » »

Aus diesen Daten berechnet sich die Explosionsgrenze des Wasserstoffs in Mischung mit Luft wie folgt:

79 Vol. Stickstoff erfordern 18,72 Vol. Knallgas. Darin sind enthalten:

12,48 Vol. Wasserstoff und 6,24 Vol. Sauerstoff. Von den 21 Vol. Sauerstoff sind also noch  $21 - 6,24 = 14,76$  Vol. mit Wasserstoff zu versetzen.

14,76 Vol. Sauerstoff erfordern 1,50 Vol. Wasserstoff. Demnach müssen zu 100 Vol. Luft zugesetzt werden:  $12,48 + 1,50 = 13,98$  Vol. Wasserstoff. Es entstehen 113,98 Vol.



an der Explosionsgrenze stehendes Wasserstoff-Luftgemisch mit einem Gehalt von 13,98 Vol. Wasserstoff oder in Prozenten

Wasserstoff . . . . .	12,27 %
Luft . . . . .	87,73 »
	<hr/>
	100,00 %

Durch den Versuch direkt gefunden sind:

Wasserstoff . . . . .	9,45 %
Luft . . . . .	90,55 »
	<hr/>
	100,00 %

Es ergibt sich somit eine Abweichung zwischen der Berechnung und dem direkten Versuch von 2,83 %, eine Gröfse, die weit auferhalb der möglichen Versuchsfehler liegt.

In ähnlicher Weise berechnet sich z. B. für ein Gemenge aus gleichen Teilen von Luft und Kohlensäureluft die Explosionsgrenze für Wasserstoff zu 13,60, während durch den Versuch (vgl. Tab. XIII a Nr. 2, S. 53) dieselbe zu 12,7 gefunden war. Auch diese Abweichung liegt auferhalb der zulässigen Fehlergrenze.

Für die Explosionsgrenze von Kohlenoxyd in Mischung mit Luft berechnet sich die Zahl 16,85, während durch den Versuch 16,50 ermittelt war. Für ein Gemisch aus gleichen Teilen Luft und Kohlensäureluft (vgl. Tab. XIV und XIV a, Nr. 2, S. 54) würde sich ein Mangel von 0,39 % Sauerstoff herausstellen und damit die Explosion nur bei überschüssigem Kohlenoxyd möglich sein. Berechnet wurden 17,93 % Kohlenoxyd, gefunden 17,35 %.

Für ein Gemisch aus Methan und Luft würde sich als untere Explosionsgrenze 7,7 % berechnen, während die Versuche 6,1 % ergeben haben. Auch hier liegt die Abweichung von 1,6 % weit auferhalb der möglichen Fehlergrenze.

In gleicher Weise könnten die Explosionsgrenzen auch für andere Gase und andere Verhältnisse berechnet werden, doch dürften die vorstehend angeführten zur Beurteilung der Sachlage genügen.



Fragt man nach der Ursache der hervorgetretenen Abweichungen, so liegt es nahe, auf die Versuche von Emich<sup>1)</sup> zurückzugreifen, welche schon im Eingange dieser Arbeit erwähnt wurden. Emich hatte feststellen können, daß die Entzündlichkeit dünner Knallgasschichten beim Verdünnen des Knallgases mit Sauerstoff zunächst zunimmt, bis das Volumenverhältnis von Wasserstoff zu Sauerstoff = 1 geworden ist. Eine Erklärung dieser Erscheinung wurde in dem Umstande gesucht, daß die Vermehrung des Sauerstoffs im Gemisch auch eine Vermehrung der Zusammenstöße zwischen den Wasserstoff- und Sauerstoff-Molekülen mit sich bringt und damit eine erhöhte Gelegenheit zum Eintritt der Reaktion zwischen denselben.

Wenn diese mechanische Erklärung der angezogenen Beobachtung von Emich zutrifft, so kann dieselbe auch im vorliegenden Falle zur Deutung der hervorgetretenen Differenzen herangezogen werden. Denn es ist dann keineswegs gleichgültig, ob in einem Gasgemenge neben dem inerten Gas und dem Knallgase noch überschüssiger Sauerstoff vorhanden ist oder nicht. Im ersteren Falle wird die Explosionsgrenze niedriger liegen als im zweiten.

Bei den Versuchen mit den Gemischen aus reinen Knallgasen und inerten Gasen ist stets nur die zur vollständigen Verbrennung des brennbaren Gases erforderliche Menge Sauerstoff vorhanden. Anders bei der Feststellung der unteren Explosionsgrenzen in Gemischen der brennbaren Gase mit Luft oder auch den Luftbestandteilen und Kohlensäure bzw. Wasserdampf. Hier findet sich überschüssiger Sauerstoff im Gemisch. Es ist daher wohl ohne weiteres verständlich, daß bei dieser Verschiedenheit der Verhältnisse die Resultate der Knallgasversuche nicht ohne weiteres mit denen der übrigen Versuchsreihen vergleichbar sind. Die aus den Knallgasversuchen berechneten Werte für die Explosionsgrenzen müssen höher liegen als die direkt durch die Versuche ermittelten, und zwar müssen die Differenzen um so größer werden, je

<sup>1)</sup> F. Emich, Mitteilungen aus dem Chemischen Laboratorium der K. K. Technischen Hochschule Graz, 1896.



mehr überschüssiger Sauerstoff in den Gemischen vorhanden ist.

Das tritt auch bei den oben durchgeführten Rechnungen deutlich hervor. Die gerechneten Werte liegen alle höher als die experimentell ermittelten, und die Abweichungen sind bei den Explosionsgrenzen der Luftgemische größer als die bei den Kohlensäure-Luftgemengen. Es scheint daher ganz allgemein der Satz zu gelten, daß überschüssiger Sauerstoff in den Explosionsgemischen die Entzündlichkeit derselben erhöht und damit die Explosionsgrenze nach unten erweitert.<sup>1)</sup>

Für die theoretische Bearbeitung der Frage, wovon die Explosionsgrenzen der brennbaren Gase und Dämpfe im allgemeinen abhängen, ist mit dieser Erkenntnis wieder ein Schritt vorwärts gethan. Indessen reicht das experimentelle Material nicht aus, die Gesetzmäßigkeit festzustellen, nach welcher der Sauerstoff die Höhe der Explosionsgrenzen beeinflusst und nach welcher sich das Verhalten der einzelnen Gase diesem Einfluß gegenüber regelt.

Die Ermittlung dieser Verhältnisse muß späteren Versuchen vorbehalten bleiben, und es erscheint nicht ausgeschlossen, daß es danach gelingen wird, die Explosionsgrenzen auf die chemischen und physikalischen Konstanten der Gase zurückzuführen.

<sup>1)</sup> Für die vorstehend gegebene Diskussion der Versuchsergebnisse ist dieses Verhalten des Sauerstoffs ohne Einfluß.